

燃机电厂燃料值班阀堵塞成因分析及工程实践

洪小飞¹ 李小龙²

(1 广东粤电大亚湾综合能源有限公司 广东 惠州 516211;
2 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司 广东 广州 510663)

摘要: 随着燃气轮机发电的比重越来越大, 全球环保政策日益严厉, 对电站燃气轮机降低碳排放的需求越来越迫切。提高燃气轮机发电可靠性, 能够有效降低化石能源的消耗, 降低碳排放。本文从硫析出机理角度对某项目供气系统值班阀故障进行分析, 给出值班阀堵塞成因分析及解决方法, 以保证燃机的安全平稳运行, 对已建或新建燃机电厂运行和维护有一定的借鉴意义。

关键词: 燃机电厂; 值班阀; 硫析出; 堵塞成因; 维护; 经济性

1 概述

到目前为止, 总装机量约 1 太瓦的风电及太阳能仅占世界总发电量约 8%。同时, 考虑到发展中国家经济增长和人口膨胀的情况, 电力总需求量上升, 而发展中国家必然会选择较便宜及更稳定的化石燃料作为首选能源, 这抵消了可再生能源的增加幅度。

随着化石燃料的短缺和《巴黎协定》等严格排放法规的颁布, 减少污染物气体排放, 提高电厂的发电效率, 已经成为工程领域越来越多学者的主要研究方向。天然气发电作为电力结构的重要组成部分, 我国《电力发展“十四五”规划》已明确了天然气发电项目建设目标, 气电装机容量可以达到 1.5 亿千瓦, 占全国装机容量的 6% 左右。随着国家为能源行业设立了碳达峰、碳中和的宏伟目标, 对电站发电机组低碳排放技术改进的需求日益增长; 与煤炭、石油等传统燃料相比, 天然气被视为最清洁的替代能源。适当发展燃机发电, 提高燃机发电可靠性将会减少碳排放^[1]。

某燃气电厂调试投产半年后发生了值班阀阀笼部位硫析出问题, 因硫析出堵塞阀笼孔, 值班气流量下降, 引起燃烧的不稳定等问题。

本文从硫析出机理角度, 给出值班阀堵塞成因分析及解决方法。对燃机电厂燃气系统阀笼堵塞处理有一定的示范参考作用。

2 值班阀堵塞成因分析

2.1 天然气含硫的危害

本文以某燃气电厂(#2 燃机) 为例, 值班阀拆解后发现阀笼壁和节流孔内附着有黄灰色物质, 经检测, 该黄灰色物质成分 90% 以上为单质硫(图 1、图 2)。

硫和硫的化合物是天然气中的有害物质, 硫在天然气中的溶解度随温度和压力的下降而降低^[2]。若天然气中含元素硫, 在高压高温条件下, 元素硫能够

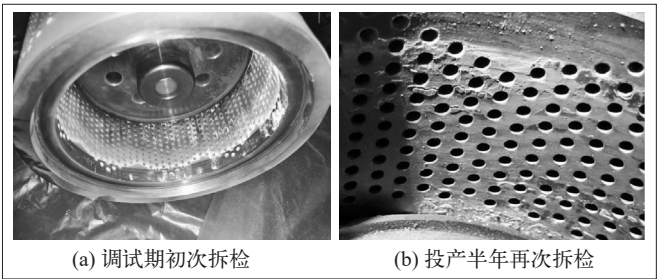


图 1 #2 燃机值班阀阀笼

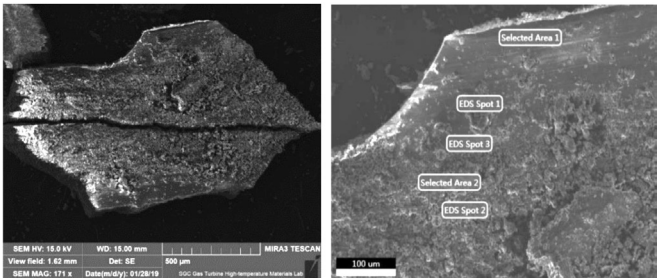


图 2 电子显微镜下析出物形态和能谱分析结果

以较大的溶解度溶解在天然气当中，在天然气输送到下游系统的过程中，随温度和压力的降低易达到硫溶解的临界过饱和状态，在阀门、节流孔板和流量计等压损大的设备中可能会发生硫析出，造成堵塞^[3]。在实际工程中，硫析出和腐蚀现象并不少见，固体硫不仅堵塞系统通道，更危险的是在含水环境、含氯离子的环境中极易形成酸，对金属设备造成严重的腐蚀（图 3）。

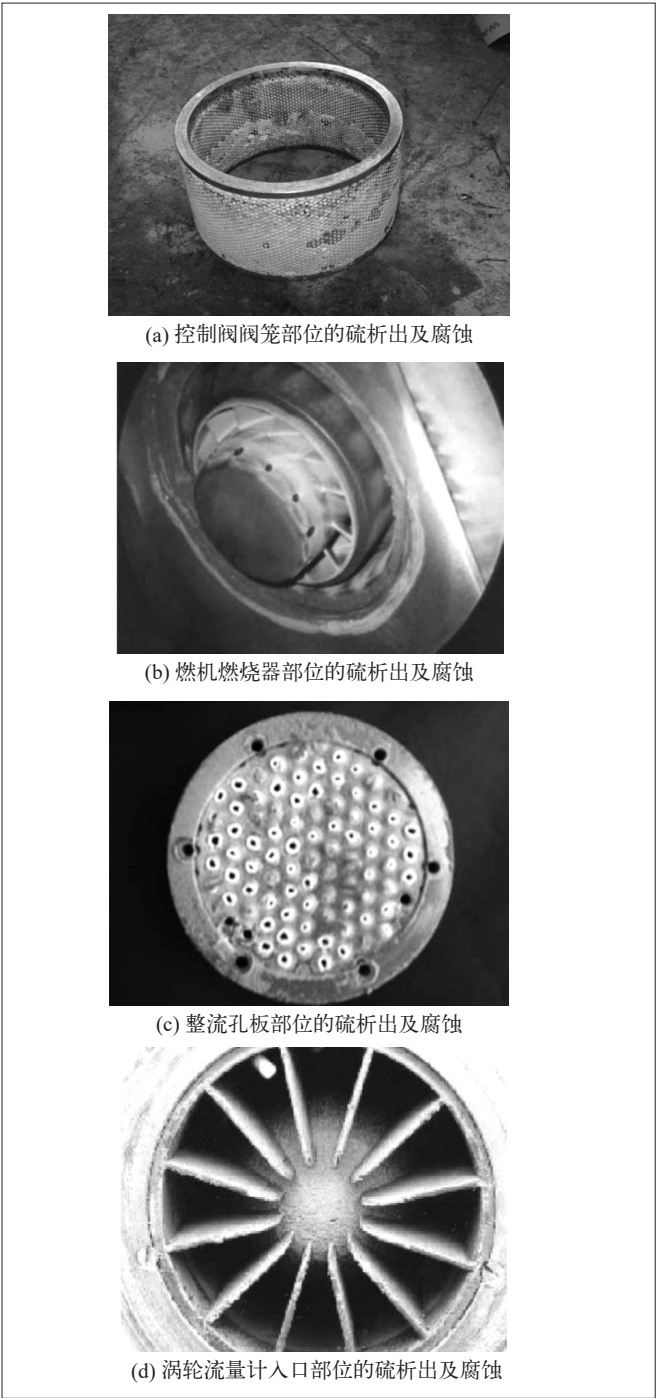


图 3 燃机典型硫析出案例图

燃机天然气系统是基于不含元素硫的气质条件而设计的，为避免天然气中所含的硫危害燃机及其辅助系统，燃机制造商的燃料规范中要求天然气中不允许含元素硫。表 1 为某燃机生产厂家对天然气燃料的要求。

表 1 某燃机燃料要求

总硫 (S)	ASTM D4468 ASTM D1072	ppm(w)	≤ 20 ⁽⁵⁾
硫化 (HS)	ASTM D4084 ASTM D4810	ppm(v)	≤ 10 ⁽⁵⁾
硫醇盐	ASTM D1988	ppm(w)	<10

硫通常与碳氢化合物结合生成 H₂S，或与碳结合生成 COS，伴随天然气一起产生。典型的气体供应商通过处理系统除掉硫的方法来限制 H₂S 的浓度小于大约 20ppmv。在浓度非常 (<100ppmv) 低时硫也可能以硫蒸汽的形式出现。

硫会直接导致硫化合物的产生，如硫醇盐、H₂S 碳酯基 COS 和增味剂 (THT)。总含硫量 >20ppm(w) 的燃料必须按规定加热到 60℃。当 H₂S 含量达到 200ppm(w) 时必须考虑其他的针对措施 / 限制。

用户应严格把控运行过程中的天然气气质，若天然气中含硫，通常有两种解决办法：一种是在系统上游设置除硫装置，另一种是将系统运行温度、压力提高以提高硫溶解度，从而避免固体硫析出。

2.2 硫析出成因分析

硫在天然气中的溶解度很小，在正常运行工况 (32bar, 1bar=0.1MPa) 下，硫在天然气中的溶解度是 0.01ppmv 的量级 (ppmv, 百万分之一体积)。图 4 是不同压力、温度下，硫在天然气当中的沉积图，

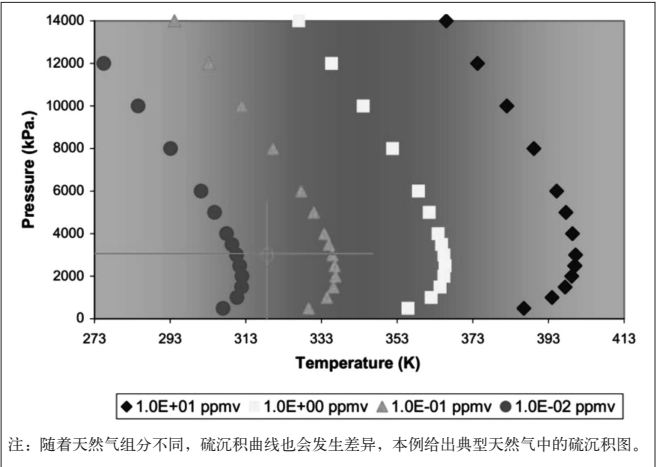


图 4 不同压力、温度下，硫在天然气当中的沉积曲线

橙色点所示即为燃机正常运行工况下（32bar，43℃）硫的饱和析出点。

该项目 11 月 5 日～8 日期间，调压站入口天然气压力从 4MPa 上升到 7MPa 以上，带来的直接影响就是燃气模块入口温度降至 35℃ 甚至更低，此时，硫饱和析出点转移到图 5 中圆圈内。

当天然气经过值班阀，因节流效应带来约 10bar 左右的压损同时伴有 5℃ 左右的温降（焦耳 - 汤姆逊效应），硫饱和析出点转移到图 6 圆圈内的位置。

从项目实际情况看来，有单质硫在值班阀阀笼处沉积，而值班阀上游系统中并未发现硫沉积，因此推测是在图 6 的过程 2 当中，达到了硫的溶解度饱和点，从而发生了硫析出。此时，硫的饱和溶解度在 0.01ppmv 以下，根据硫沉积曲线的分布，可以合理地假设图 6 的过程 2 当中，硫的饱和溶解度下降了 0.001ppmv。

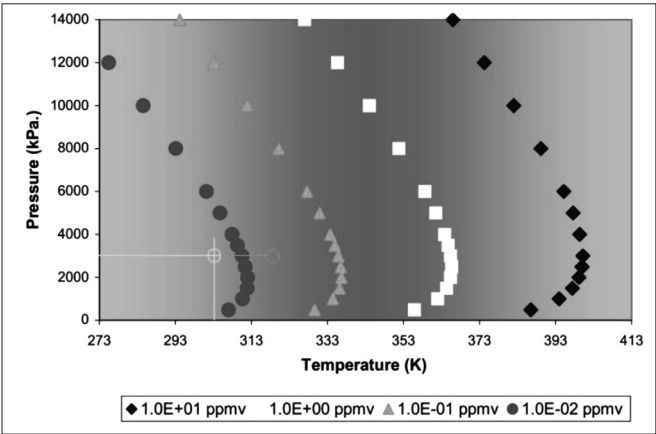


图 5 项目天然气中硫饱和析出点随工况变化发生转移

质量浓度与体积浓度的关系按式（1）计算：

$$\eta_w=\frac{M}{V_{\text{mol}}} \eta_v \tag{1}$$

式中：W－标况质量浓度（mg/Nm³）；
M－标况溶质分子量，假设析出物仅为单硫（S），则其分子量为 32；
V_{mol}－标况下气体体积，即 22.4L/mol；
η_v－标况体积浓度（ppmv）。

则在图 6 的过程 2 当中，硫的饱和溶解度下降量以质量浓度为 1.42×10⁻³mg/Nm³。这意味着，每当有 1Nm³ 的天然气流过值班阀，会产生 1.42×10⁻³mg 的单质硫沉积。

取 11 月至次年 1 月为计量时间段，假设这段时期内的满负荷运行时数为 100h，则用气量为：

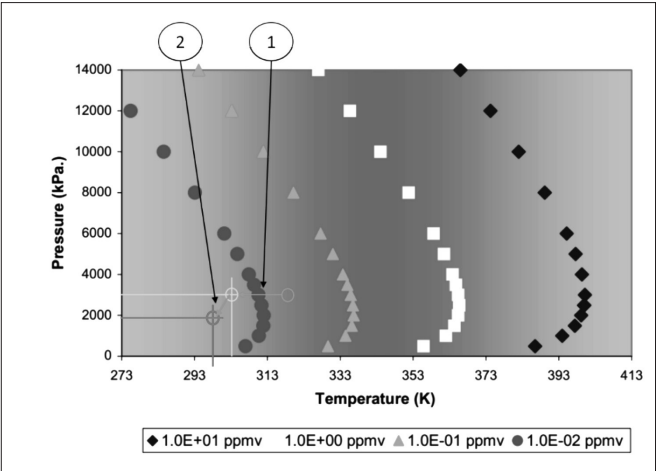


图 6 经值班阀后，硫饱和析出点再次转移

100h×80000Nm³/h=8×10⁶Nm³，则总的硫析出量为 11.36g。计算结果与下一年 1 月拆解值班阀所看到的真实情况大致相当。

从上述计算过程可以看出，即使天然气只含有 0.01ppmv 量级的硫，当达到饱和析出点后，在长期大流量运行的情况下，也会产生明显的阀笼堵塞。因此，无论是单质硫还是总硫，建议的检测精度应至少达到 0.01ppmv。如表 2 所示，项目未对元素硫进行专门测定，并对总硫的测定精度仅到 1.5mg/kg（相当于 1.5ppmv），远达不到对硫元素检测精度的要求。

表 2 气质第三方检测报告数据

PROPERTY	METHOD	RESULT UNITS
Analysis of Natural Gas and Similar Gaseous mixtures by GC	GPA 2261-13	
Nitrogen		0.07 % Mole
Methane		91.78 % Mole
Ethane		5.70 % Mole
Propane		1.12 % Mole
Iso-Butane		0.13 % Mole
n-Butane		0.17 % Mole
Iso-Pentane		0.01 % Mole
n-Pentane		<0.01 % Mole
Hexanes and Heavier (Hexanes Plus)		<0.01 % Mole
Oxygen		<0.01 % Mole
Carbon Dioxide		1.02 % Mole
Sulfur	ASTM D3246-15	<1.5 mg/kg

3 值班阀堵塞问题解决方法

结合项目运行的天然气成分分析, 解决硫析出的最佳方法即燃料预热。假设将前置模块入口天然气预热到 55°C 左右, 那么硫在天然气中的溶解度将大幅提高, 如图 7 所示, 硫在天然气中的饱和溶解度将上升到接近 0.1ppmv , 能有效避免硫的析出。2019 年 1 月 25 日, 当将调压站两台热水锅炉全部投用, 燃气温度由 37°C 上升到 42°C , 明显观察到硫不再析出, 从而佐证了燃料预热是有效解决硫析出的方案^[4]。

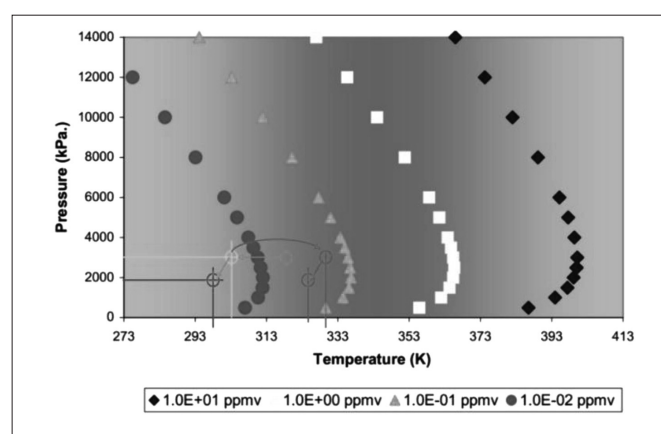


图 7 燃料预热到 55°C 后, 硫在天然气中的溶解度将大幅提升

此外, 可采用余热锅炉的热水 (或联合循环废热), 使联合循环中低品质热得以应用^[5]。经核算, 天然气温度从 30°C 加热到 55°C , 天然气耗量降低 $95\text{Nm}^3/\text{h}$, 预估可多发电约 0.57MW 。燃料预热前期所投入的改造费用可在运行过程中获得补偿, 并带来长期收益。

4 结语

天然气中含有元素硫会妨害系统设备的安全和寿命, 在长期大流量运行情况下, 硫会在天然气系统的阀笼部位析出, 导致了阀笼堵塞, 影响燃机的正常运行。

根据硫在天然气中溶解特性和析出机理, 天然气预热能有效地避免硫地析出, 天然气预热不仅能够解决硫析出问题, 同时从长远来看, 也能够提高机组经济性。

参考文献:

- [1] Ghobad Bagheri, Ranzi Eliseo, Pelucchi Matteo, et al. Comprehensive kinetic study of combustion technologies for low environmental impact: MILD and OXY-fuel combustion of methane[J]. Combustion and Flame, 2020 (212): 142-155.
- [2] 杨学锋, 黄先平, 钟兵, 等. 高含硫气体中元素硫溶解度实验测定及计算方法研究[J]. 天然气地球科学, 2009, 2(3): 416-419.
- [3] 韩建清. 燃气轮机高温部件的损伤机理与运行维护对策[J]. 发电设备, 2014, 28(5): 323-327.
- [4] 胡文欣, 张克舫, 王照亮, 等. 高含硫天然气引射增压的数值模拟及硫析出分析[J]. 山东科学, 2018, 6(31): 41-49.
- [5] 叶菲菲. AE94. 3A 型燃机性能加热器系统设计研究[J]. 设计与分析, 2019, 8(10): 130-131.

作者简介: 洪小飞 (1982.09-), 男, 汉族, 江苏淮安人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 发电设备研究维护。